Energy, Mines and Resources Canada
Énergie, Mines et Ressources Canada

CANMET

Canada Centre for Mineral and Energy Technology
Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

Ontario

Ontario Mining Association

ÉTUDE APPROFONDIE DES PARAMÈTRES DE LA SOURCE DES SÉISMES À LA MINE QUIRKE D'ELLIOT LAKE, EN ONTARIO

SP91 -2F

THE ENERGY OF OUR RESOURCES · THE POWER OF OUR IDEAS

L'ENERGIE DE NOS RESSOURCES · NOTRE FORCE CRÉATRICE

ÉTUDE APPROFONDIE DES PARAMÈTRES DE LA SOURCE DES SÉISMES À LA MINE QUIRKE D'ELLIOT LAKE, EN ONTARIO

Shengzao Chen
Laboratoire d'Elliot Lake
Janvier 1991

Laboratoire de recherche minière

Rapport spécial de CANMET
SP 91-2F

MICROMEDIA

28pp

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1992
N° de cat. M38–15/91–2F
ISBN 0–662–97693–2

92-07766/

ÉTUDE APPROFONDIE DES PARAMÈTRES DE LA SOURCE DES SÉISMES À LA MINE QUIRKE D'ELLIOT LAKE, EN ONTARIO

Shengzao Chen*

RÉSUMÉ

L'auteur a réalisé une analyse approfondie des paramètres de la source de 37 épisodes sismiques provoqués par l'exploitation minière à la mine Quirke d'Elliot Lake, en Ontario. Son but était d'étudier l'hypothèse de l'autosimilarité dans la loi d'échelle appliquée au spectre sismique de microséismes causés par l'activité minière. L'énergie élevée des ondes sismiques P, le rapport E_p/E_s étant de 5 % à 30 %, et le fait qu'environ 80 % des épisodes sismiques sont caractérisés par un rapport $E_s/E_p < 10$ %, semblent confirmer l'affirmation selon laquelle la plupart des épisodes relatifs aux données obtenues dans la mine correspondent très probablement à des mécanismes focaux à couple non double. Ils sont également caractérisés par la libération de faibles contraintes, en particulier de faibles contraintes apparentes au-dessous de la limite de 0,2 $\Delta\sigma$, et par une faible énergie sismique totale. Pour le même moment sismique, les valeurs énergétiques totales varient selon des contraintes apparentes se situant entre 10 KPa et 200 KPa, ce qui concorde avec les données obtenues dans la mine Heinrich Robert en Allemagne. L'auteur a également constaté que le calcul énergétique de Gutenberg-Richter concorde très bien avec l'ensemble des données relatives aux magnitudes pour la mine Quirke (0,7 à 2,3 Mn), et pour la mine Heinrich Robert (1,2 à 2,3 M_L). En présence de la même énergie sismique totale, les contraintes apparentes sont limitées par un moment sismique de 80 GN.m et 800 GN.m. La diminution de contrainte observée est fonction du moment sismique, ce qui laisse supposer une invalidité de la loi d'échelle relativement aux épisodes sismiques provoqués par l'activité minière. Une analyse de la vitesse et de l'accélération de pointe des particules fournit une preuve de l'atténuation sismique dans l'ensemble de la zone fracturée située au-dessus de la région des coups de toit à l'intérieur de la mine.

Mots-clés : analyse des formes d'onde; paramètres de la source sismique; mécanisme focal; coup de toit.

* Chercheur du Bureau sismologique d'État de Chine. Invité à titre de boursier postdoctoral au Laboratoire d'Elliot Lake, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Elliot Lake (Ontario).

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ i
INTRODUCTION 1
MOMENT SISMIQUE ET DIMENSION DE LA SOURCE 3
ÉNERGIE SISMIQUE DES ONDES P ET S 5
CALCUL DE LA LIBÉRATION DES CONTRAINTES 10
VITESSE ET ACCÉLÉRATION DE POINTE DES PARTICULES 13
COMMENTAIRE 17
CONCLUSIONS 20
REMERCIEMENTS 20
BIBLIOGRAPHIE 21

TABLEAU

1. Liste des épisodes de coups de toit dans la mine Quirke 2

FIGURES

1. Rayon de la source r_o^p en fonction de r_o^s 4
2. Moment sismique en fonction du rayon de la source 6
3. Relation entre l'énergie des ondes P et des ondes S 8
4. Énergie sismique en fonction du moment sismique 9
5. Contrainte apparente en fonction de l'énergie sismique, limitée par des droites de moment sismique constant 11
6. Chute des contraintes en fonction du moment sismique 12
7. Contrainte apparente σ_α en fonction de la chute des contraintes $\Delta\sigma$ 14
8. Vitesses et accélérations de pointe des particules dans le cas des ondes P et S 15
9. Vitesse de pointe des particules, mise à l'échelle, en fonction de la magnitude des coups de toit et déterminée dans un contexte sismologique 16
10. Vitesse de pointe des particules en fonction de la racine cubique de la distance mise à l'échelle, dans le contexte des travaux de sautage 18

INTRODUCTION

Par analyse des formes d'onde et inversion de la vitesse, nous avons délimité la zone de rupture dans la mine d'uranium de Quirke à Elliot Lake, en Ontario, zone qui ne se prolonge pas jusqu'à la mine Denison adjacente (Chen et Hedley, 1990; Chen, 1990). En faisant une comparaison avec la mine Heinrich Robert en Allemagne (Gibowicz et al., 1990), nous avons constaté l'existence possible de coups de toit à mécanisme à couple non double dans la mine Quirke, et donné une interprétation géologique. Nous approfondissons ici l'étude du mécanisme focal et l'hypothèse de la similarité appliquée à la microsismicité de la mine. Nous ajouterons de nouvelles relations d'échelle concernant le mouvement dynamique du sol.

Certains auteurs ont noté l'influence du cadre géologique sur l'ampleur de la chute des contraintes (Rautian et al., 1978) ; ils ont signalé l'importance de la profondeur et le rôle du contexte tectonique dans les relations d'échelle (McGarr, 1984, 1985). Feignier (sous presse) propose même d'introduire des corrections qui tiennent compte de l'influence de la géologie et de la mécanique des roches sur la magnitude des paramètres de la source. Il reste à savoir comment ces corrections seront apportées, et nous en discuterons dans les pages qui suivent.

Par ailleurs, à mon avis, si nous voulons étudier les propriétés géologiques et les propriétés de la mécanique des roches, nous ne devrions pas et, en fait, n'avons pas à éliminer les effets traduisant l'atténuation inélastique, puisqu'ils reflètent les vraies caractéristiques tectoniques et mécaniques de la masse rocheuse dans la région de coups de toit. Il ne fait pas de doute que si des corrections pouvaient être apportées adéquatement et intégralement, nous observerions des relations d'échelle uniformes; toutefois, dans le cadre de la géologie, nous ne verrons rien concernant les paramètres. La situation est comparable à l'inversion de la gravité dans laquelle nous utilisons diverses méthodes de traitement à différentes fins; par exemple, pour étudier des structures régionales à grande échelle, il faudra éliminer les anomalies locales; mais pour étudier la structure à l'échelle locale, il faudra tenir compte des anomalies locales.

Selon l'hypothèse de la similarité, telle que définie par Aki (1967), les épisodes sismiques de petite et de grande envergure suivent le même processus de rupture. La similarité implique l'existence d'une loi d'échelle entre la puissance de la densité spectrale et la dimension des failles pour des séismes de magnitude différente. Cette relation est établie d'après les mesures de la chute des contraintes, laquelle doit être indépendante du moment sismique et de la dimension de la source pour que l'hypothèse de la similarité soit valide. Dans le cas de séismes importants et de séismes modérés, cette caractéristique a été confirmée par d'innombrables études (par ex., Kanamori et Anderson, 1975), mais dans le cas de microséismes ($M < 3$), de nombreux écarts ont été observés par rapport à cette relation, ce qui montre que les chutes de contraintes sont fonction des moments sismiques, tandis que la dimension de la source reste à peu près constante (par exemple Fletcher et al., 1986; Dysart et al., 1988).

Dans la mine Quirke, les coups de toit provoqués par l'exploitation minière sont comparables à des microséismes de magnitude comprise entre 0,7 et 2,3 Mn (tableau 1). Ces analyses de données sont donc essentielles à l'étude de la loi d'échelle et des mécanismes focaux des microséismes.

Tableau 1 - Liste des épisodes de coups de toit dans la mine Quirke
(les épisodes 1 à 18 ont été enregistrés au moyen d'accéléromètres)

Épisode	Date	Heure	Magnitude (Mn)	Épisode	Date	Heure	Magnitude (Mn)
1	27-03-87	00:01:05	0,7	20	28-08-87	03:35:00	1,6
2	16-04-87	18:26:06	1,1	21	28-08-87	07:40:51	1,4
3	17-04-87	14:39:56	1,2	22	28-08-87	07:53:48	0,8
4	17-04-87	15:27:59	0,7	23	29-08-87	07:46:55	2,3
5	18-04-87	02:51:50	1,4	24	04-09-87	15:36:07	0,8
6	19-04-87	07:19:05	0,7	25	05-09-87	19:03:07	0,9
7	19-04-87	09:41:17	1,7	26	06-09-87	07:58:33	1,2
8	25-04-87	13:04:27	0,8	27	06-09-87	07:59:20	0,9
9	26-04-87	23:50:41	0,7	28	09-09-87	06:22:28	1,2
10	29-04-87	01:13:24	0,8	29	08-10-87	17:04:06	1,4
11	02-05-87	15:47:27	0,7	30	15-10-87	00:50:53	1,1
12	02-05-87	16:58:45	0,8	31	24-11-87	07:16:55	2,1
13	06-05-87	04:48:34	0,7	32	24-11-87	18:45:45	1,8
14	07-05-87	20:06:14	0,1	33	24-11-87	18:50:46	0,8
15	07-05-87	20:47:54	0,7	34	29-11-87	07:29:29	1,8
16	09-05-87	07:33:01	0,7	35	18-12-87	23:51:14	1,9
17	17-05-87	05:44:26	0,8	36	19-12-87	09:43:07	1,0
18	21-05-87	17:46:38	1,0	37	09-12-87	22:03:24	1,7
19	28-08-87	01:07:54	0,9				

MOMENT SISMIQUE ET DIMENSION DE LA SOURCE

Le niveau de basse fréquence (plateau) Ω_o du spectre est directement lié au moment sismique M_o:

$$M_o = \frac{4\pi\rho c^3 R\Omega_o}{F_c} \qquad \text{Équation 1}$$

où $\Omega_o = \sqrt{\Omega_{SH}^2 + \Omega_{SV}^2}$ pour les ondes S, ρ est la densité du matériau à la source, c est soit la vitesse α des ondes P, soit la vitesse β des ondes S, R est la distance par rapport à l'hypocentre, et F_c représente le schéma de rayonnement des ondes sismiques. On a laissé de côté une correction de surface libre. Dans l'équation 1, on a choisi les constantes suivantes : $\rho = 2{,}7$ g/cm^3, $\alpha = 5\,940$ m/s, $\beta = 3\,600$ m/s, $F_\alpha = 0{,}39$ et $F_\beta = 0{,}57$ (Chen et Hedley, 1990).

Dans le cas des 37 épisodes figurant au tableau 1, nous avons $M_o^p = 0{,}93\ M_o^s$ qui est proche de 1, ce qui laisse supposer que le moment a été correctement calculé, même si quelques-unes des valeurs attribuées aux ondes S semblent plus élevées que celles attribuées aux ondes P.

Les calculs relatifs à la dimension de la source dépendent beaucoup du modèle. Le rayon r_o de la faille circulaire est inversement proportionnel à la fréquence de coin f_o :

$$r_o = \frac{K_c c}{2\pi f_c} \qquad \text{Équation 2}$$

où K_c est une constante fonction du modèle de la source. Dans les études relatives à la sismicité de la mine Quirke, on a estimé la dimension de la source d'après les modèles de Brune (1970, 1971) et de Trafunac (1972) dans lesquels $K_\beta = 2{,}34$ et $K_\alpha = 1{,}97$. Le rapport $r_o^p / r_o^s = 0{,}94$ qui se rapproche de 1 indique des résultats plus cohérents en ce qui concerne les calculs de r_o à partir de f_o^p et de f_o^s, ce qui correspond aux valeurs acceptées des fréquences de coin.

La figure 1 montre la relation entre r_o^p et r_o^s dans le cas de 37 épisodes sismiques survenus dans 5 sites de la mine, et indique des valeurs variant d'environ 15 à 120 m pour les ondes P, et de 30 à 90 m pour les ondes S. Les valeurs moyennes provenant de 5 sites et applicables à chacun des épisodes se situent entre 32 et 104 m dans le cas des ondes P, et entre 39 et 73 m dans le cas des ondes S. Le rayon d'action moyen des épisodes sismiques tel que déduit des ondes S et P est compris entre 45 et 90 m, ce qui est nettement moins que les 70 à 180 m notés dans la mine de charbon Heinrich Robert en Allemagne (Gibowicz et al., 1990).

Dans les lois d'échelle relatives à la source, qui décrivent de quelle façon la dimension de la source augmente en fonction du moment sismique, il devient évident que la similarité disparaît dans le cas de petits séismes caractérisés par un moment sismique se situant au-dessous de 10^4 à 10^5 GN.m, c'est-à-dire qu'il se produit une nette diminution de la chute des contraintes à mesure que diminue le moment sismique (par exemple, Hasewaga, 1983; Archuleta, 1986; Chun et al., 1989). Une autre manifestation de la disparition de la similarité est la divergence observée entre l'échelle de l'accélération de pointe et la vitesse au sol par rapport aux considérations théoriques fondées sur les relations de similarité (McGarr, 1986).

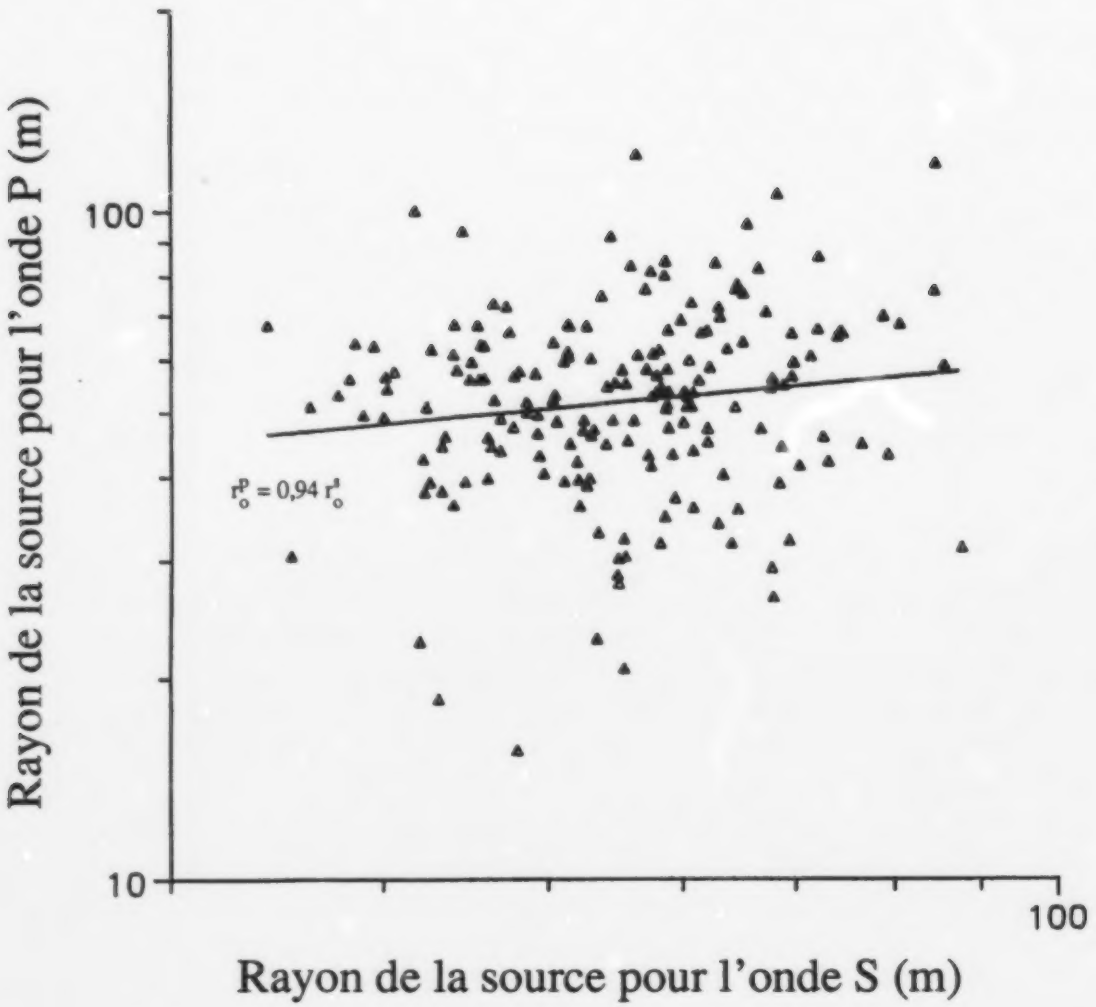

Figure 1 - Rayon de la source r_o^P en fonction de r_o^s.

Il apparaît que les relations d'échelle, dans notre ensemble de données relatives à la mine Quirke (figure 2), sont de même nature, tout en ayant un moment plus faible compris entre 51 et 2 022 (c'est à dire 10^1 à 10^3) GN.m., et aussi que la chute des contraintes est fonction du moment. Le moment sismique en fonction du rayon de la source est limité par les lignes représentant la chute constante des contraintes entre 100 KPa et 5 MPa. Ce résultat est comparable à celui du moment 10^2 à 10^3 GN.m obtenu pour la mine Heinrich Robert du bassin de la Ruhr, en Allemagne (Gibowicz et al., 1990), et intégré dans la même figure.

Des preuves très convaincantes de la disparition des relations d'échelle dans le cas des petits séismes existent également dans d'autres études sur la sismicité causée par l'exploitation minière. On a observé de façon indubitable une chute des contraintes avec la réduction du moment sismique lors de faibles secousses survenues dans des mines, le moment étant compris entre 10^2 et 10^4 GN.m dans les mines de cuivre de Pologne (Gibowicz, 1985) et dans les mines d'or profondes de l'ouest de l'Afrique du Sud (Bicknell et McGarr, 1988; Cichowicz et al., 1988).

Dans de nombreuses études, on attribue cet écart par rapport au principe de similarité à un effet exercé par la source et caractérisé soit par une limite supérieure de la fréquence rayonnée, donc par l'existence d'une longueur caractéristique des failles, soit par une relation entre les contraintes et le moment sismique (par exemple Aki, 1987, 1988; Madariaga, 1987). D'autres chercheurs expliquent les changements d'échelle des spectres par un effet d'atténuation inélastique, ou par tout autre processus limitant les hautes fréquences, soit l'effet dit de largeur de bande (par exemple Hanks, 1982; Fletcher et al., 1986). Boore (1986) a montré qu'un filtre indépendant du moment, capable d'atténuer les fréquences élevées quelle que soit leur origine, produisait les changements marqués de l'échelle que laisse prévoir l'analyse courante de modèles autosimilaires. En outre, on a aussi signalé l'existence d'un effet propre au site pour expliquer ce phénomène (Frankel, 1982; Malin et al., 1985; et Peppin, 1985).

Dans le cas que nous étudions, celui de la mine Quirke, les fréquences de coin se situent tout à fait dans l'intervalle considéré de largeurs de fréquence. Les impulsions enregistrées sont simples et nettes, le rapport signal/bruit est suffisamment élevé même lors des épisodes sismiques les plus insignifiants, et les distances de l'hypocentre sont faibles. Par conséquent, les effets de la source et les effets d'atténuation semblent jouer le rôle le plus important dans le cas présent. Cependant, l'atténuation est négligeable en raison de la grande proximité des épisodes sismiques par rapport au réseau de capteurs (Semadeni et al., 1988), et les effets d'atténuation seront considérés comme une caractéristique de la zone de rupture, dans le contexte de cette étude.

ÉNERGIE SISMIQUE DES ONDES P ET S

L'énergie sismique rayonnée par les ondes P, soit Ep, ou les ondes S, soit Es, peut être directement calculée à partir de l'intégrale J, si l'on exprime de la façon suivante le flux énergétique des ondes :

$$E_c = \frac{4\pi\rho c R^2 J}{F_c^2} \qquad \text{Équation 3}$$

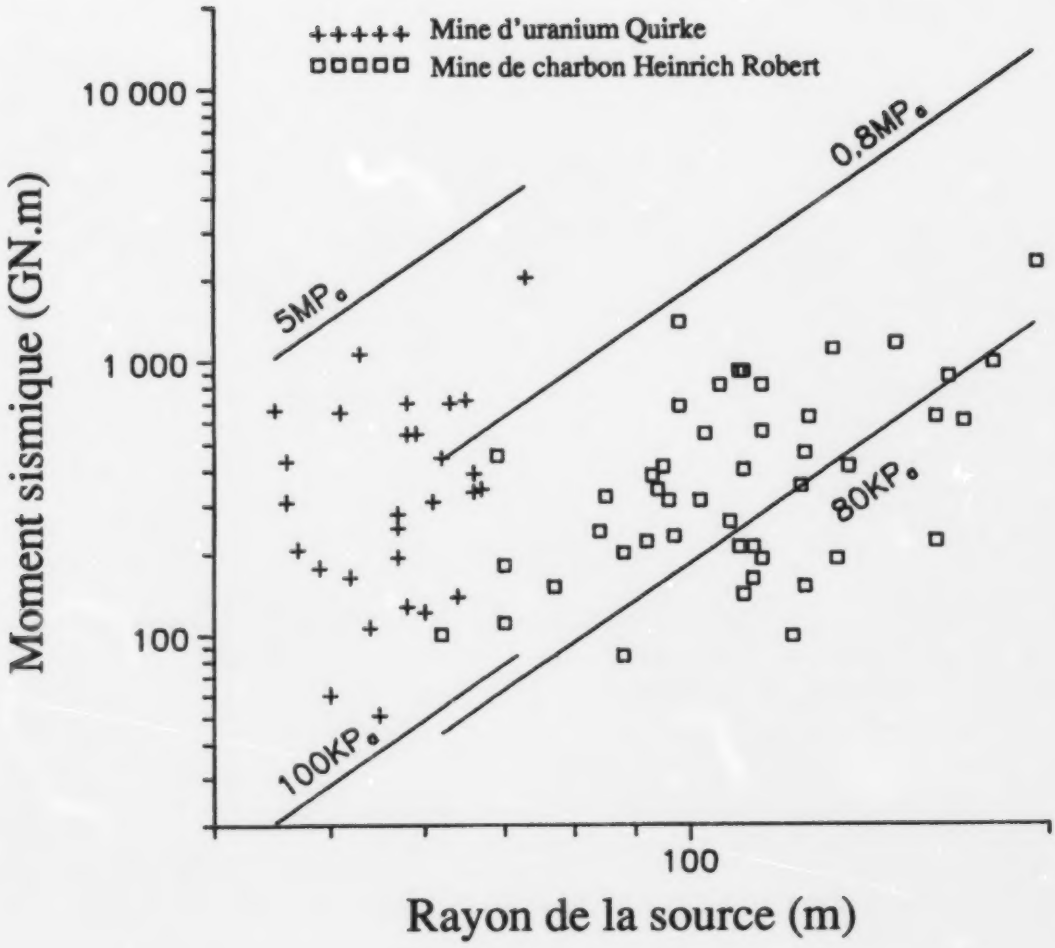

Fig. 2 - Moment sismique en fonction du rayon de la source. Les lignes droites représentent les valeurs de la chute constante des contraintes.

où $J = \int^{T_c} V_c^2 dt$, V_c étant la vitesse au sol des ondes P ou S, c étant α ou β, c'est-à-dire la vitesse des ondes P ou S.

On tient compte de la perte d'énergie due à l'atténuation dans le calcul du flux énergétique, même si elle a été ignorée en raison de la grande proximité de la plupart des épisodes sismiques par rapport au réseau de capteurs. Si l'on oriente les sismomètres selon des axes orthogonaux, on peut calculer l'énergie sismique totale comme étant la somme de chaque composante.

La figure 3 montre la relation entre E_p et E_s, où deux droites représentant les rapports constants E_p/E_s sont mesurées à 5 % et 30 %. Le rapport de l'énergie des ondes S à l'énergie des ondes P se situe entre 1,5 et 30. Pour 77 % des 26 épisodes sismiques survenus à la mine Quirke, ce rapport est inférieur à 10; 19 % se situent entre 10 et 15. Sur un total de 37 épisodes sismiques indiqués au tableau 1, nous avons les pourcentages de 78 % pour $E_s/E_p < 10$, 14 % pour $E_s/E_p = 10$ à 15, 8 % pour E_s/E_p supérieur à 15. Il existe deux rapports inexpliqués et trop élevés, soit 38 et 48 dans le cas des épisodes sismiques 16 et 15 respectivement, rapprochés du site 2 sur la marge nord de la zone de rupture apparue dans la mine. Généralement, la fraction plus élevée de l'énergie des ondes P et la valeur élevée du rapport E_p/E_T, soit 22 % (Chen et Hedley, 1990), sont semblables aux valeurs caractérisant la mine de charbon Heinrich Robert en Allemagne (Gibowicz et al., 1990), où le rapport E_s/E_p se situe entre 1,5 et 30, et les deux tiers de ces valeurs sont inférieures à 10.

La représentation de l'énergie sismique totale (E_T) en fonction du moment sismique, à la figure 4, indique que les valeurs de l'énergie sont limitées par des lignes de contraintes apparentes constantes comprises entre 10 KPa et 200 KPa. L'énergie sismique correspondant à un moment sismique donné varie donc d'un facteur de 20. Ce résultat concorde aussi avec celui donné par Gibowicz et al. (1990), bien que le module de cisaillement μ diffère dans deux mines, une valeur μ plus élevée de 30 GPa se manifestant dans la mine Quirke. Lors de la modélisation de la distribution de E_T en fonction de M_o dans la mine de charbon d'Allemagne, nous avons noté de faibles valeurs de μ, soit environ 11 GPa, ce qui suggère un contexte géologique et mécanique différent de celui de la mine Quirke.

On a employé la relation d'énergie sismique de Gutenberg-Richter, $\log E = 9{,}9 + 1{,}9\, M_L - 0{,}024\, M_L^2$ (Gutenberg et Richter, 1956), pour les calculs de l'énergie indiqués à la figure 4. Dans certains cas, cette relation donne des valeurs énergétiques bien inférieures à la réalité (par ex., Boatwright, 1984; Gibowicz et al., 1990). En combinant les résultats que nous avons obtenus dans la mine Quirke à ceux de la mine de charbon, comme mentionné, les valeurs obtenues pour l'énergie concordent parfaitement avec celles données par la relation de Gutenberg-Richter. Cela signifie que la relation de Gutenberg-Richter pourrait être satisfaite par un intervalle plus grand de magnitudes relatives aux coups de toit. Comme il a été démontré pour la mine Quirke, les magnitudes se situent entre 0,7 et 2,3 Mn, et dans la mine de charbon entre 1,2 et 2,3 M_L, selon l'échelle des magnitudes de Richter; ces valeurs sont supérieures d'environ 0,3 Mn à celles de l'échelle des magnitudes de Nuttli.

Étant donné que lors des séismes naturels, l'énergie des ondes P ne représente qu'une faible fraction de celle des ondes S, le rapport E_s/E_p se situe entre 20 et 30 (par ex., Boatwright et al., 1984). Bien que l'on n'ait jusqu'ici constaté aucune différence systématique entre les épisodes provoqués par l'activité minière et les séismes naturels, et que la plupart des découvertes relatives au mécanisme des séismes soient applicables aux secousses survenant dans les mines, il est de plus en plus évident que des mécanismes focaux autres que ceux dus à la rupture par

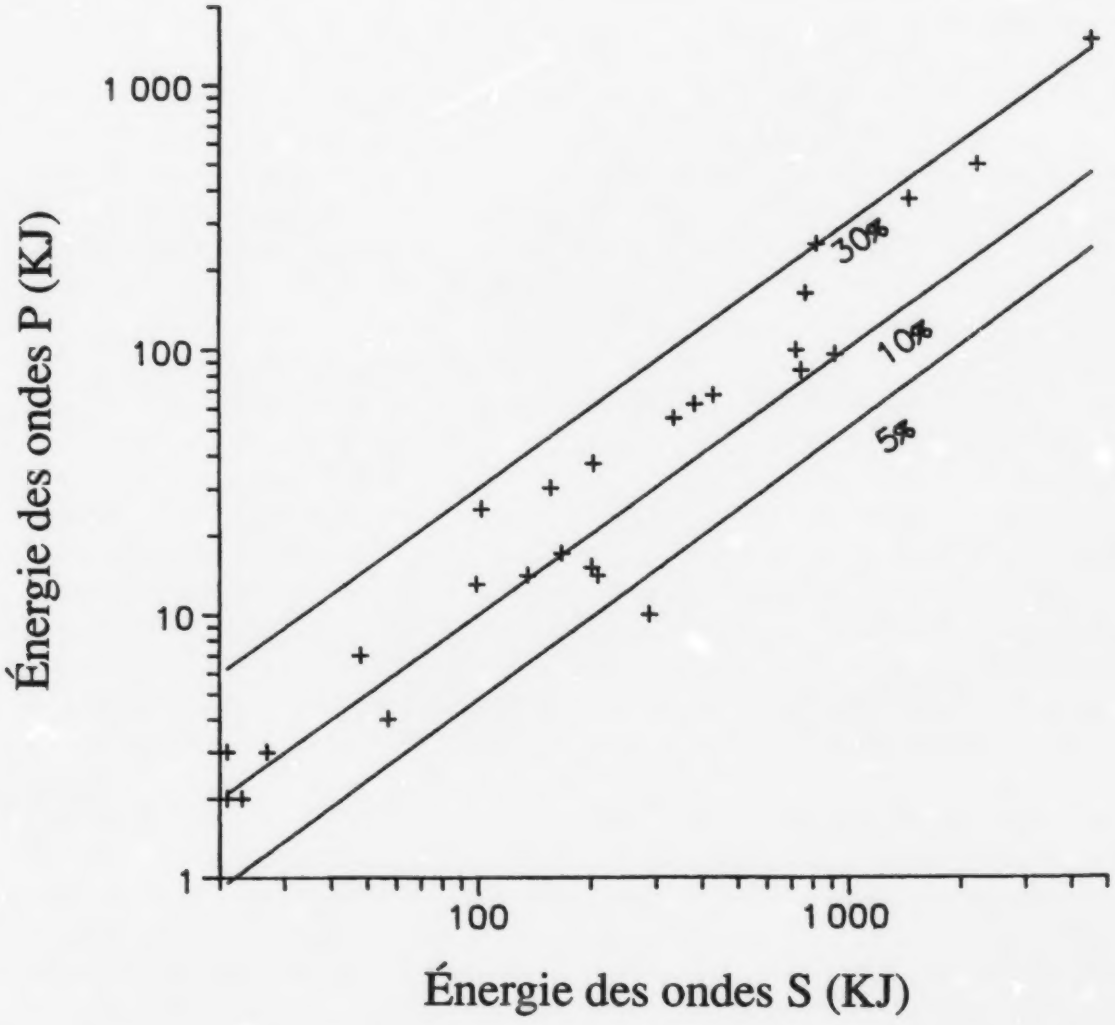

Fig. 3 - Relation entre l'énergie des ondes P et des ondes S.

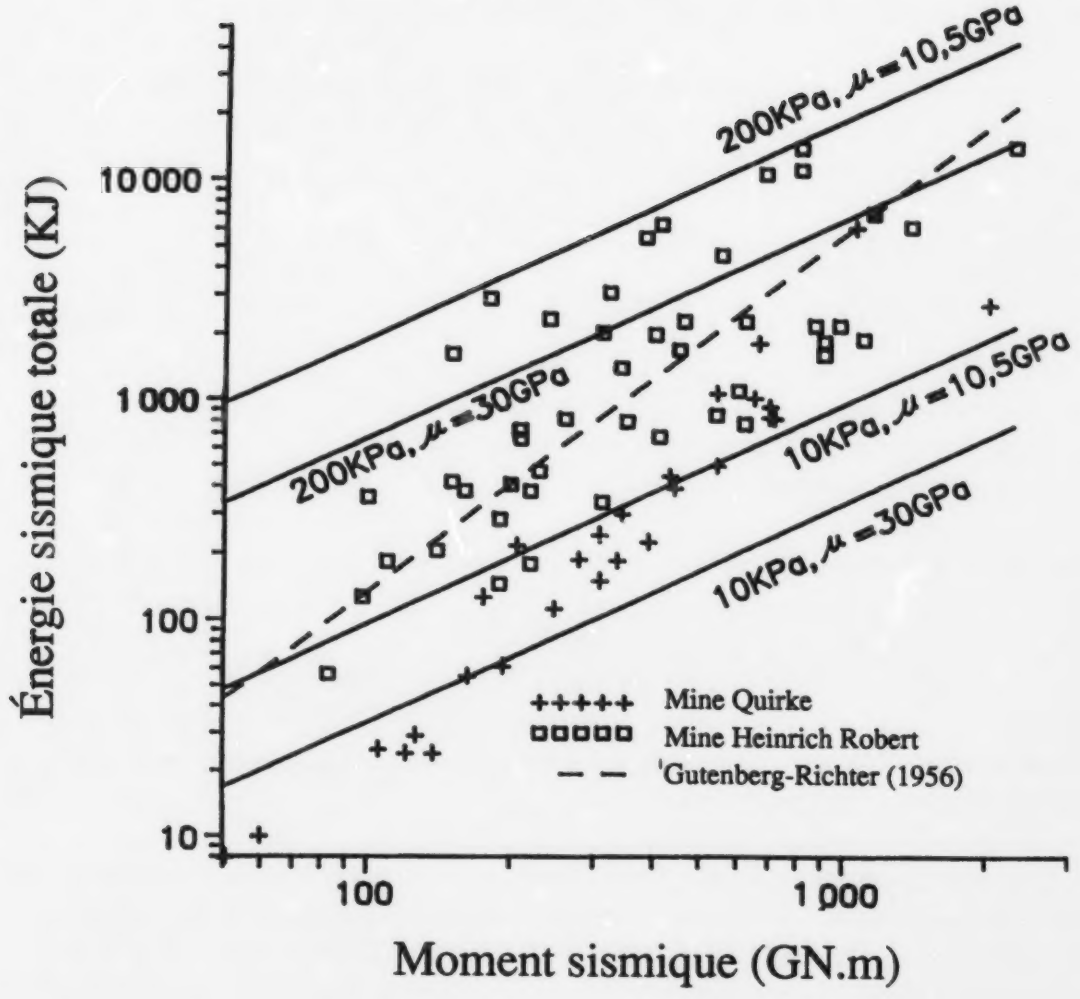

Fig. 4 - Énergie sismique en fonction du moment sismique. Les droites des contraintes constantes montrent l'étendue de la variation de l'énergie pour un moment sismique donné. La relation de Gutenberg-Richter est indiquée.

cisaillement peuvent exister (par ex., Rudajev et al., 1985). Si l'on fait une comparaison avec le rapport présenté par Gibowicz et al. (1990) à propos de la mine Heinrich Robert, on peut tirer une conclusion semblable, à savoir que l'atténuation observée des ondes S pourrait s'expliquer par un mécanisme focal à couple non double régissant certains épisodes sismiques causés par l'exploitation minière, et renforçant l'énergie rayonnée par les ondes P.

CALCUL DE LA LIBÉRATION DES CONTRAINTES

On emploie actuellement différentes méthodes de calcul applicables à la libération des contraintes au cours des séismes. Deux d'entre elles conviennent ici : la contrainte apparente, et la chute des contraintes modifiée selon Brune (1970, 1971), appelée chute des contraintes statiques.

On peut exprimer la contrainte apparente de la façon suivante :

$$\sigma_a = \eta\bar{\sigma} = \frac{\mu E_q}{M_o} \qquad \text{Équation 4}$$

où μ est le module de rigidité à la source, η est l'efficacité sismique et $\bar{\sigma} = (\sigma_o + \sigma_1)/2$ est la contrainte de cisaillement moyenne agissant sur la faille, c'est-à-dire la contrainte efficace, σ_o et σ_1 étant les niveaux des contraintes avant et après la manifestation d'un séisme.

En supposant qu'il y ait eu libération complète des contraintes, on peut calculer la chute des contraintes de la façon suivante :

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16}\,\frac{M_o}{r_o^3} \qquad \text{Équation 5}$$

qui représente la réduction uniforme de la contrainte de cisaillement qui contribue à produire le glissement sismique suivant la faille circulaire.

La figure 5 représente la contrainte apparente en fonction de l'énergie sismique, limitée par les droites de moment sismique constant dans la gamme de 80 GN.m à 800 GN.m; elle indique une faible contrainte apparente ne dépassant pas 200 KPa. Avec les deux ensembles de données relatifs à E_s/E_p, l'un inférieur à 10 et l'autre supérieur à 10, on voit que la contrainte apparente augmente toujours en fonction de l'énergie sismique à plus faible vitesse que ne laissent prévoir les droites qui représentent le moment sismique. La raison la plus plausible est que l'efficacité sismique η, paramètre indéterminé qu'il conviendrait d'étudier, est en fait moindre qu'habituellement à cause de la zone de rupture présente au-dessus de la zone de coups de toit dans la mine Quirke; dans cette zone, le milieu fracturé aurait donc des caractéristiques inélastiques.

La chute des contraintes observée est fonction du moment sismique à l'intérieur d'un intervalle limité du rayon de la source, soit entre 0,45 et 0,7 m (figure 6). Cela prouve clairement l'interruption, dans les relations d'échelle, de la similarité des petits séismes, et aussi de certains épisodes sismiques causés par des travaux d'exploitation minière.

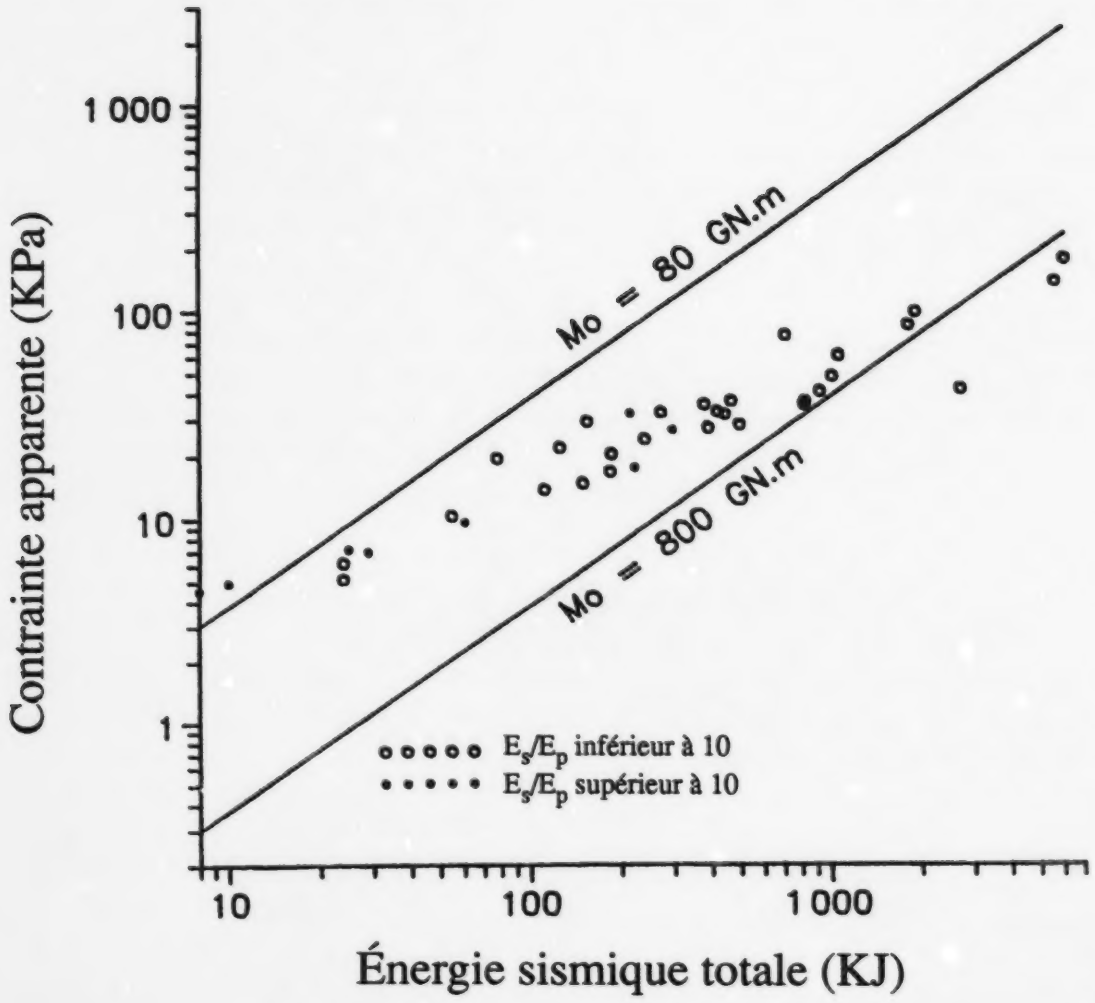

Fig. 5 - Contrainte apparente en fonction de l'énergie sismique, limitée par des droites de moment sismique constant. Les cercles pleins et les cercles vides représentent des épisodes de cisaillement pur, et des épisodes caractérisés par un mécanisme focal à couple non double.

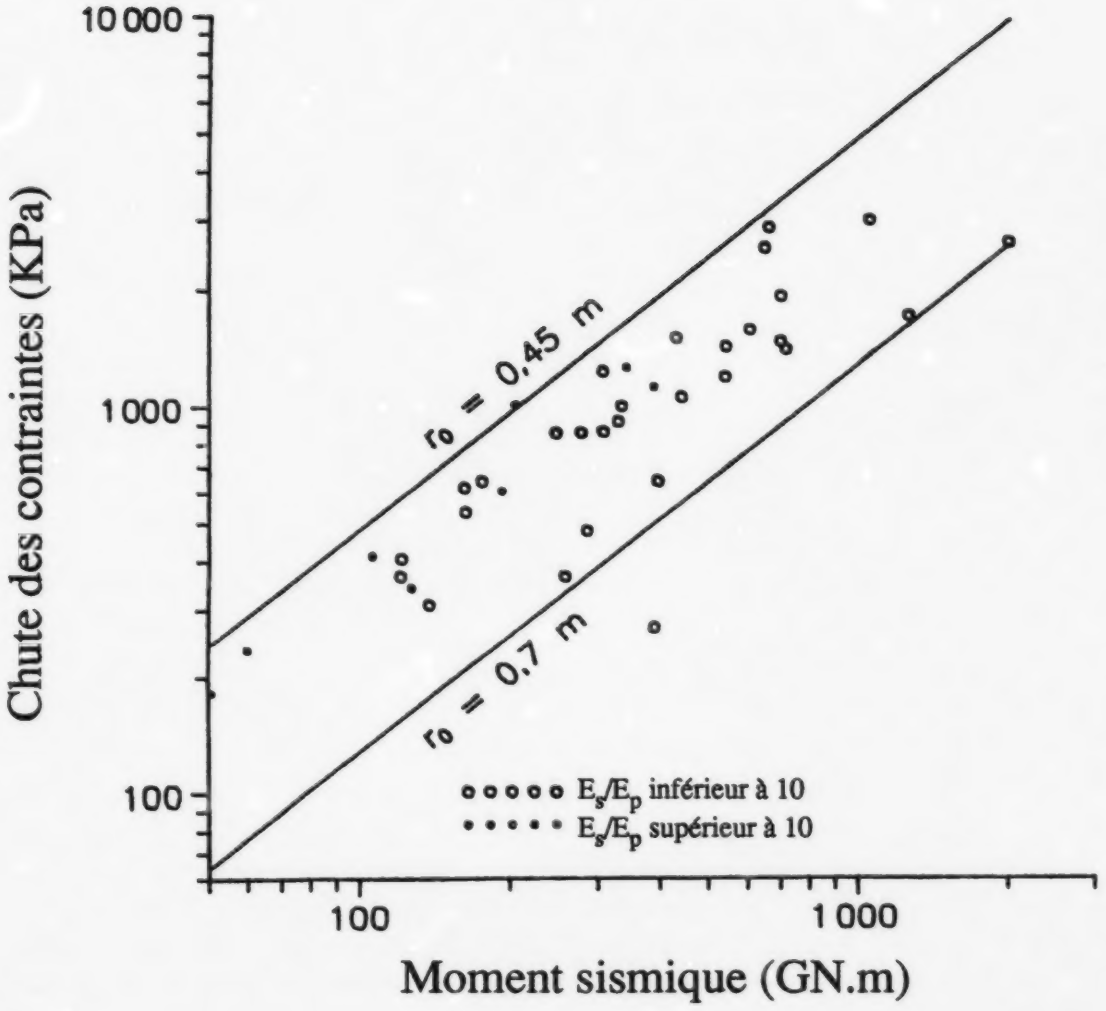

Fig. 6 - Chute des contraintes en fonction du moment sismique. Les droites indiquent les rayons constants de la source, soit 0,45 m et 0,7 m. En ce qui concerne les cercles pleins et les cercles vides, consultez la figure 5.

Par comparaison avec les valeurs de la chute des contraintes, tous les épisodes de coups de toit survenus dans la mine Quirke sont caractérisés par de faibles valeurs de la contrainte apparente. Pour une même chute des contraintes, la contrainte apparente varie dans un intervalle de moins de 20 %, limitée par des droites qui correspondent à 0,02 et 0,2, comme l'indique la figure 7. Cette relation présente une bonne concordance avec l'un des deux ensembles de données relatives à la mine de charbon allemande, lequel montre un rapport σ_a à $\Delta\sigma$ faible, soit environ 8 % (Gibowicz et al., 1990; figure 14), et semble très caractéristique des épisodes sismiques à couple non double.

La plupart des épisodes repérés par des cercles vides aux figures 5, 6 et 7 présentent des rapports élevés énergie des ondes P/énergie des ondes S, et sont caractérisés par une faible énergie sismique totale pour la même magnitude. Par exemple, les épisodes 4 et 6 de même magnitude 0,7, indiqués par des cercles vides, ont une énergie totale de seulement 24 KJ, tandis que pour l'épisode 13, indiqué par des cercles pleins, l'énergie totale se rapproche de 216 KJ.

Dans la mine de charbon allemande, la majeure partie des épisodes possibles à couple non double présentent aussi des rapports constants élevés des fréquences de coin pour les ondes P et S (Gibowicz et al., 1990). Cependant, dans la mine Quirke, la relation correspondante n'est pas assez nette pour différencier nettement les deux ensembles de données des figures 5 à 7. Les écarts par rapport aux autres résultats pourraient être attribués à la fracturation de la masse rocheuse au-dessus de la zone de coup de toit à la mine Quirke.

VITESSE ET ACCÉLÉRATION DE POINTE DES PARTICULES

Les vitesses de pointe des particules (VPP) et les accélérations de pointe des particules (APP) déduites de l'analyse des formes d'ondes dans le contexte des épisodes sismiques de la mine Quirke (tableau 1) montrent la même tendance générale pour les ondes P et les ondes S, avec une pente d'environ 0,54. Lorsque les deux éléments sont combinés, la relation apparaît plus clairement (figure 8).

On peut exprimer la relation entre la VPP, la distance et la magnitude de la façon suivante :

$$\text{Log}(RV)_p = 0{,}71\ Mn - 1{,}65 \qquad \text{Équation 6}$$

pour les ondes P dans la mine (figure 9). Après combinaison avec la relation applicable aux ondes S, c'est-à-dire $\text{Log}\ (RV)_s = 0{,}60\ Mn - 1{,}33$ (Chen et Hedley, 1990), les résultats ont été établis pour évaluer l'importance de la masse rocheuse endommagée dans la zone des coups de toit, laquelle est représentative non seulement de la mine Quirke, mais aussi de la mine Denison adjacente et des mines Creighton et Strathcona du nord de l'Ontario (Hedley, 1988).

La théorie de l'élasticité laisse prévoir que l'atténuation de la vitesse de pointe des particules doit diminuer avec la distance de la source au taux R^{-n}. Par conséquent, la relation entre VPP, la magnitude (M) et la distance (R) peut être analysée d'une autre manière et exprimée par $\hat{V} = L(\frac{R}{10^{M/3}})^n$, L étant une constante.

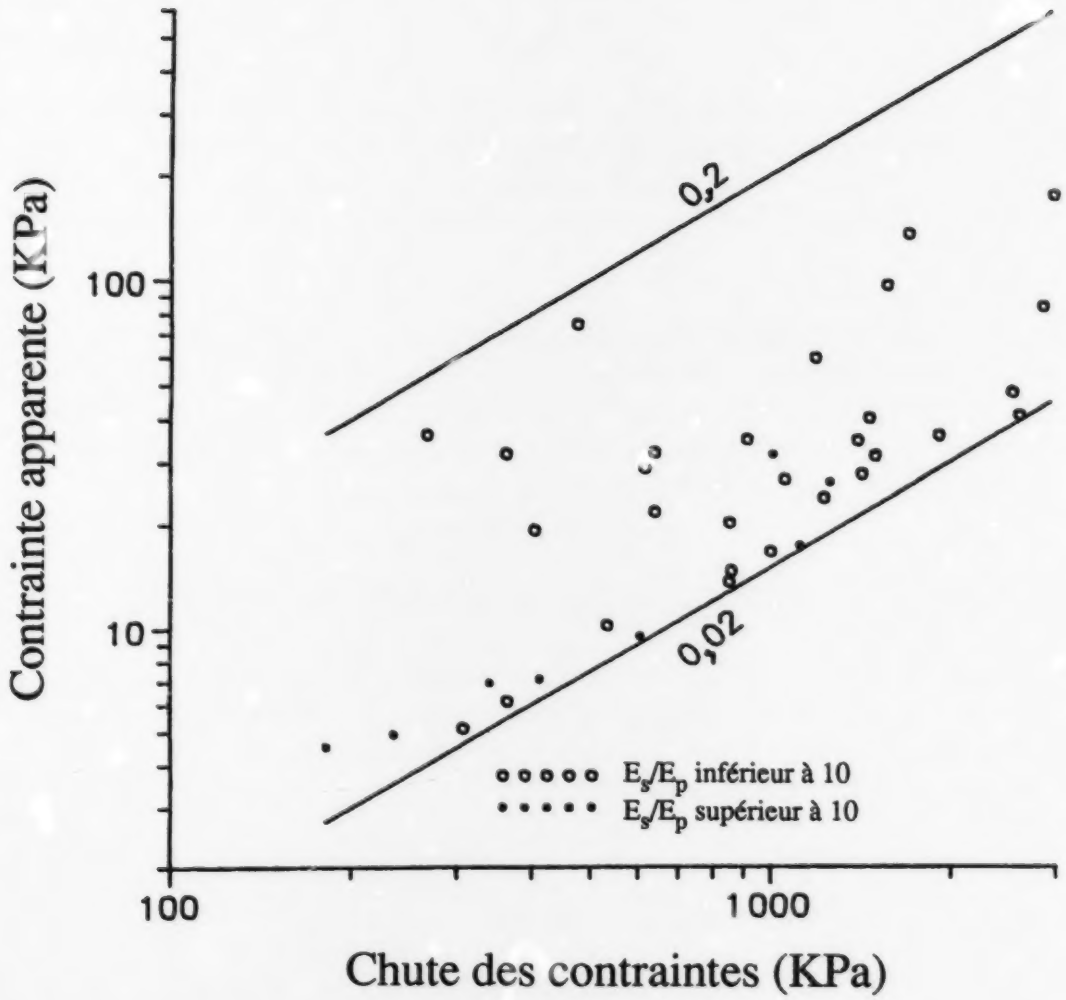

Fig. 7 - Contrainte apparente en fonction de la chute des contraintes $\Delta\sigma$. Les droites indiquent le rapport $\sigma_a/\Delta\sigma$. Pour l'explication des cercles vides et des cercles pleins, voyez la figure 5.

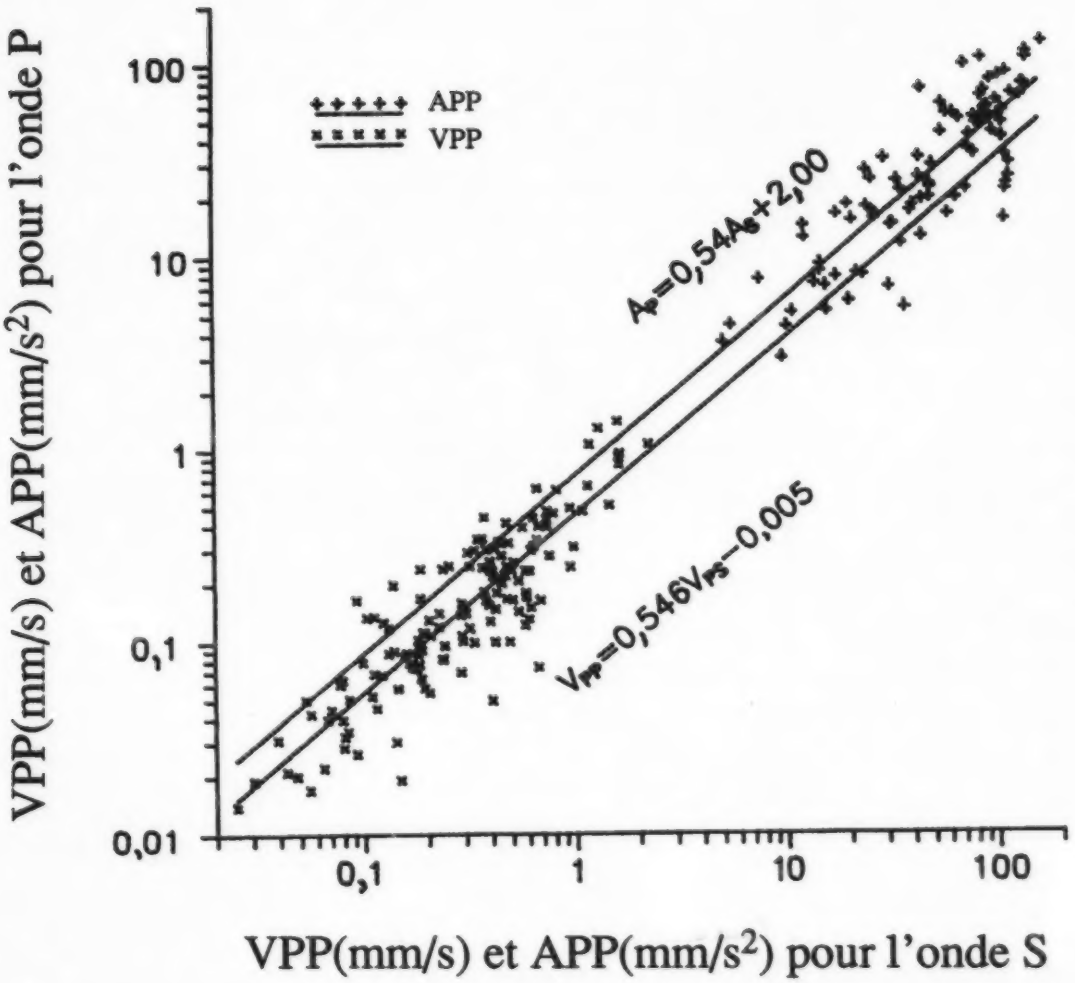

Fig. 8 - Vitesses et accélérations de pointe des particules dans le cas des ondes P et S.

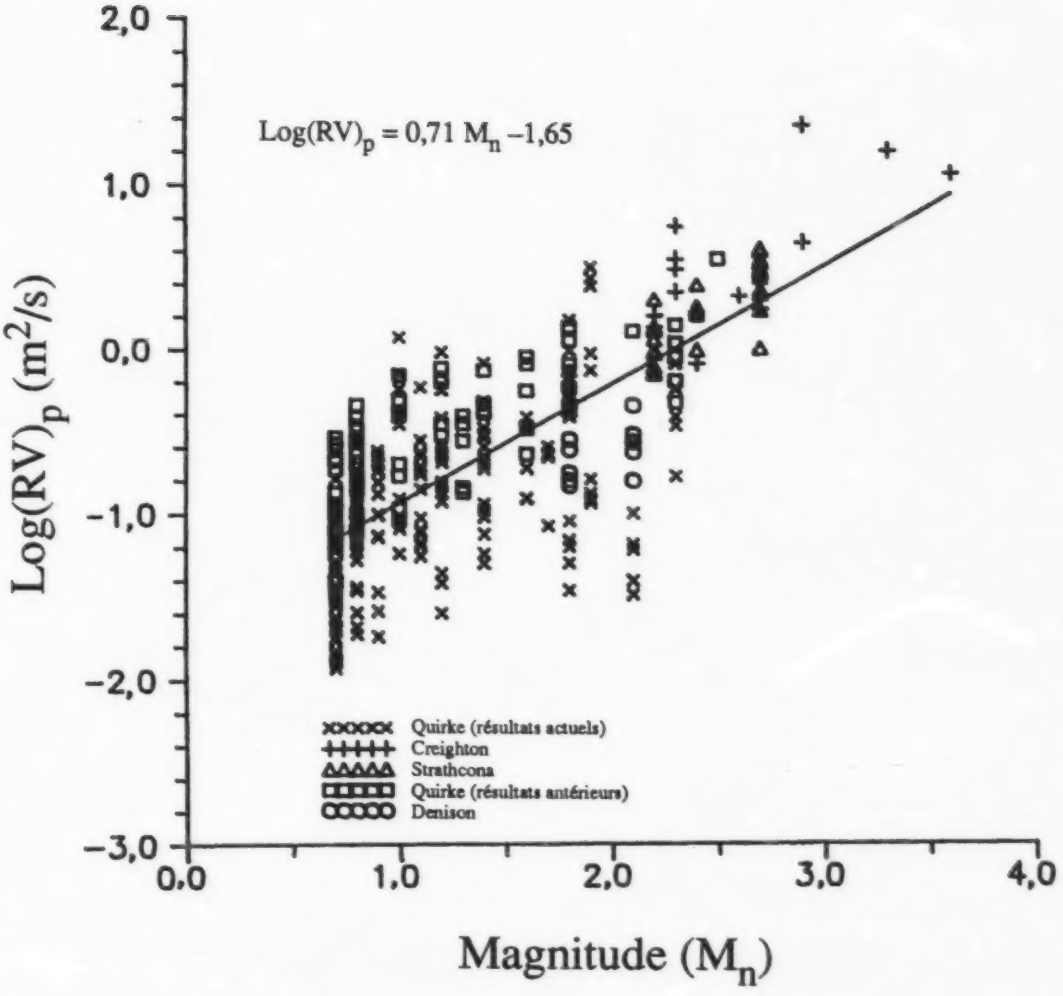

Fig. 9 - Vitesse de pointe des particules, mise à l'échelle, en fonction de la magnitude des coups de toit et déterminée dans un contexte sismologique.

Hedley (1988) a présenté cette fonction de la façon suivante :

$$\hat{V} = 4\,000\,(\frac{R}{10^{M/3}})^{-1,6} \qquad \text{Équation 7}$$

pour les 25 épisodes enregistrés dans les mines Quirke, Creighton et Denison. Au moyen des nouvelles données VPP introduites ici, cette relation a été affinée :

$$\hat{V} = 1\,823\,(\frac{R}{10^{M/3}})^{-1,6} \qquad \text{Équation 8}$$

La figure 10 montre la vitesse de pointe des particules en fonction de la racine cubique de la distance. On observe le même facteur d'atténuation n = -1,6 , et seule la constante L = 1 823 est inférieure à la valeur indiquée dans l'équation 7.

Dans la mine Quirke, le toit de la principale zone de coups de toit est fortement fracturé jusqu'à sa surface (à environ 500 m de profondeur). Les forages au diamant ont rencontré plusieurs fissures ouvertes atteignant parfois 15 cm de large, qui s'étendent sur une vaste étendue (Hedley, 1988). Les mesures et l'analyse de la vitesse et de l'accélération de pointe des particules confirment toutes l'existence d'une atténuation sismique sur l'étendue de la zone fracturée au-dessus de la région de coups de toit dans la mine.

COMMENTAIRE

En physique, l'énergie sismique peut être décrite comme une intégration, autour de la surface circulaire s_o englobant la surface sismique, du flux d'énergie rayonné par les ondes sismiques élastiques pendant la durée d'un séisme (Koctpob, 1975).

$$E_q = -\int_o^{t_m} dt \int_{s_o} r_{ij} u_i n_j ds \qquad \text{Équation 9}$$

où t_m est la durée du séisme; r_{ij} est la contrainte calculée en fonction des déplacements des ondes sismiques par la loi de Hooke, et indique la différence entre le tenseur de la contrainte variable σ_{ij} et le tenseur de la contrainte initiale σ^o_{ij}, c'est-à-dire $r_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma^o_{ij}$. Cela signifie que l'énergie sismique n'est pas individuellement fonction de σ^o_{ij} et de σ^1_{ij}, mais seulement de la variation du tenseur de la contrainte r_{ij}.

On ne tient pas compte, dans le calcul de l'équation 9, des ondes réfléchies par la surface libre du sol. On suppose donc que le sol constitue un milieu élastique infini. Dans le cas de la mine Quirke, le milieu fracturé et l'atténuation non élastique influent sur les valeurs énergétiques observées; par conséquent les valeurs sont moindres. On peut même ne pas tenir compte de l'atténuation non élastique lorsque la distance des épisodes sismiques est courte par rapport aux sites d'installation des capteurs.

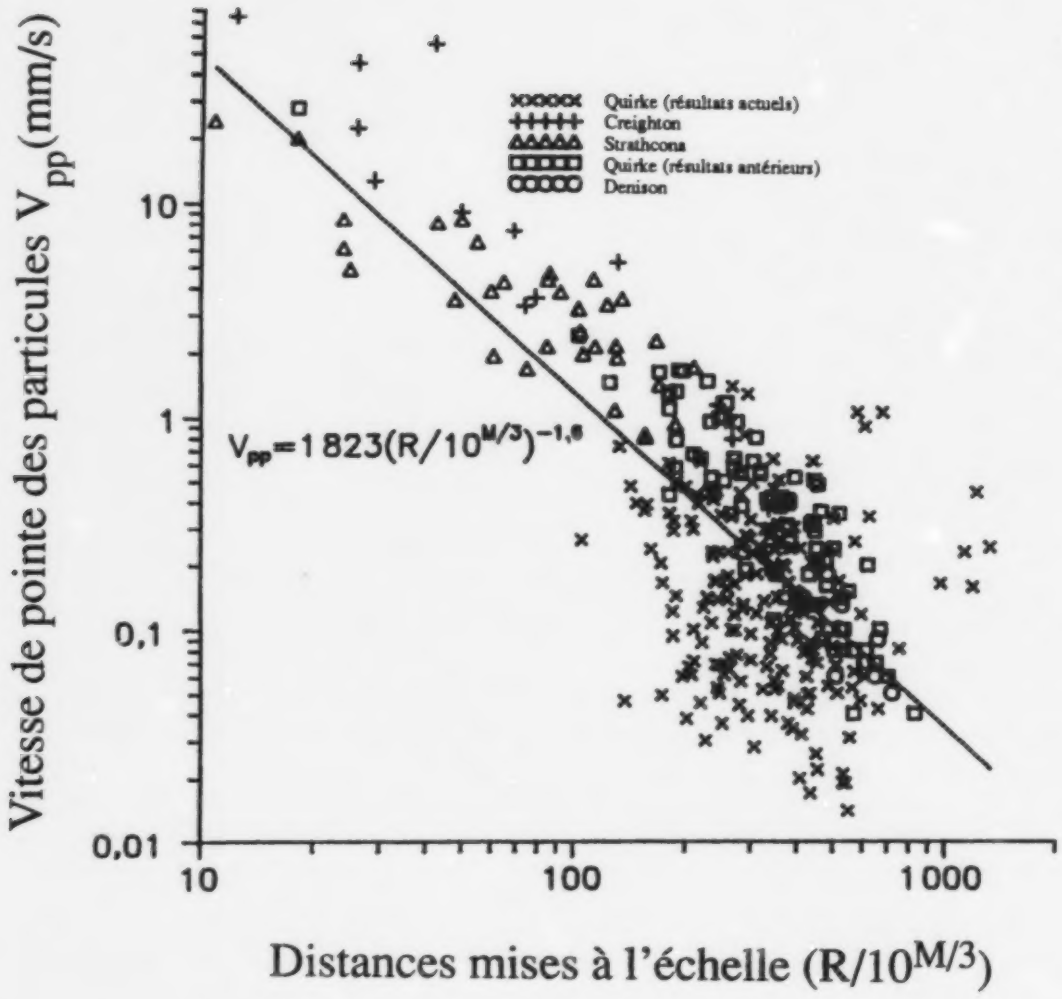

Fig. 10 - Vitesse de pointe des particules en fonction de la racine cubique de la distance mise à l'échelle, dans le contexte des travaux de sautage.

Selon la loi de la conservation de l'énergie, à condition de ne pas tenir compte de la rupture de la roche durant un séisme, et d'admettre qu'il existe une interaction mutuelle entre deux surfaces de la faille, due aux effets de frottement, c'est-à-dire si l'on ne tient pas compte de la variation de σ_{ij} en fonction du temps, on peut établir une équation approximative pour calculer l'énergie,

$$E_q = \frac{1}{2\mu} \Delta\sigma M_o \qquad \text{Équation 10}$$

et par conséquent, on peut représenter la contrainte apparente par :

$$\sigma_\alpha = \eta\sigma = \frac{1}{2} \Delta\sigma \qquad \text{Équation 11}$$

Dans ce cas, la contrainte apparente ne représente que la moitié de la chute des contraintes.

De fait, en raison du manque d'homogénéité à l'échelle microscopique et du fait que les surfaces de la faille ne sont pas lisses, les contraintes qui s'exercent sur cette faille devraient varier irrégulièrement en fonction du temps. Si l'on tient compte de la perte d'énergie rayonnée par les ondes de courte période, et associée aux effets rayonnants des frottements, et que l'on utilise une valeur moyenne des contraintes rayonnantes de frottement, exprimée par le rapport perte par rayonnement/moment sismique, on peut représenter l'énergie sismique par l'équation suivante :

$$E_q = \frac{1}{\mu} (\frac{1}{2} \Delta\sigma - \sigma_r) M_o \qquad \text{Équation 12}$$

et l'on peut exprimer la contrainte apparente par :

$$\eta\sigma = \frac{1}{2} \Delta\sigma - \sigma_r \qquad \text{Équation 13}$$

où σ_r est la valeur moyenne de la contrainte de frottement rayonnée.

De l'équation 11 ou de l'équation 13, on peut facilement déduire que la valeur de la contrainte apparente est moindre que la libération des contraintes ou la chute des contraintes, et que cette différence est inférieure ou égale à la moitié de la chute des contraintes.

Cette analyse paraît convenir dans le cas de la mine Quirke, où la faible contrainte apparente au-dessous de la droite 0,2 $\Delta\sigma$, apparaissant à la figure 7, indique une contrainte de frottement de l'ordre de 0,3 $\Delta\sigma$ à condition que le mécanisme de cisaillement puisse expliquer les épisodes survenus dans la mine. Cependant, le rapport élevé énergie des ondes P/énergie des ondes S, l'énergie sismique totale plus faible, et un déplacement moyen de valeur élevée (1,69) de la fréquence de coin (Chen et Hedley, 1990) indiquent que la plupart des épisodes sismiques dans la mine Quirke sont les plus favorables à des mécanismes à couple non double, comparativement à la mine de charbon allemande (Gibowicz et al., 1990), bien que quelques-uns de ces épisodes présentent un plus faible rapport E_s/E_p que ne l'indiquent les figures 5 à 7.

Je dois insister sur les propriétés de fracturation dans la mine Quirke, et recommande de faire des observations sur les paramètres de la source qui sont une caractéristique originale de la zone de rupture. À cette fin, les corrections apportées pour tenir compte d'effets géologiques ou mécaniques ne sont pas valides. Dans certains cas, pour réduire la dispersion des paramètres de la source dans les relations d'échelle, on a effectué de telles corrections. En prenant comme référence l'écart-type moyen de tout l'ensemble de données, on a placé ces valeurs de référence dans un large intervalle allant de 33 % (Thatcher et al., 1973) à 50 % (Tucker et al., 1973). Dans les résultats présentés par Feignier (sous presse), cet écart se situe entre 46 % et 37,5 % avant et après la correction, avec des valeurs du même ordre de grandeur. Ces écarts plus importants montrent clairement qu'il est extrêmement difficile de faire une correction adéquate. Des études plus poussées doivent être faites.

CONCLUSIONS

1. La chute des contraintes observée dans la mine Quirke est fonction du moment sismique, ce qui laisse supposer l'invalidité des relations d'échelle dans le cas de microséismes, et surtout de la plupart des épisodes sismiques causés par l'activité minière dans la mine.

2. Un rapport plus élevé énergie des ondes P/ énergie des ondes S (5 % - 30 %), une faible libération des contraintes et en particulier une contrainte apparente faible (au-dessous de 0,2 $\Delta\sigma$) étaient des caractéristiques communes à chacun des 37 épisodes sismiques survenus dans la mine Quirke en 1987. Cela traduit une caractéristique spécifique d'inélasticité de la zone fracturée dans cette mine. Une analyse de la vitesse et de l'accélération de pointe des particules prouve qu'il se produit une atténuation des effets sismiques dans l'ensemble de la zone de rupture.

3. Des études additionnelles sur les paramètres de la source confirment l'hypothèse selon laquelle les épisodes de haute énergie générés par les ondes P sont probablement caractérisés par un mécanisme focal à couple non double. On doit décrire de deux façons les propriétés du milieu et leur influence sur le déroulement des séismes, soit le lissage à l'échelle macroscopique et l'absence d'homogénéité à l'échelle microscopique.

REMERCIEMENTS

Cet article a été supervisé par D.G.F. Hedley, PhD, et R. Tervo, PhD. L'auteur désire exprimer ses remerciements à ces personnes et à P. Rochon qui a revu le manuscrit, et également à M. Plouffe et à tous les membres du Laboratoire qui ont collaboré à ce travail. L'étude a été financée par le CRSNG.

BIBLIOGRAPHIE

Aki, K. «Scaling law of seismic spectrum»; *J. Geophys Res*, vol 7, pp 1217-1231; 1967.

Aki, K. «Magnitude-frequency relation for small earthquakes: a clue to the origin of f_{max} for large earthquakes»; *J. Geophys Res*, vol 92, pp 1349-1355; 1987.

Aki, K. «Physical theory of earthquakes»; dans : Seismic Hazard in Mediterranean Regions. J. Bonnin, M. Cara, A. Cisternas, R. Fantechi (dir.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 3-33; 1988.

Archuleta, R.J. «Downhole recordings of seismic radiation»; dans : Earthquake Source Mechanics. S. Das, J. Boatwright et C.H. Scholz (dir.), Maurice Ewing, vol 6, Am. Geophys. Union, Washington, D.C., pp 319-329; 1986.

Bicknell, J. et McGarr, A. «Underground recordings of mine tremors - implications for earthquake source scaling»; *Proc 2nd Int Symp Rockbursts and Seismicity in Mines*, Université du Minnesota, Minneapolis, pp 129-138; juin 1988.

Boatwright, J. «Seismic estimates of stress release»; *J. Geophys Res*, vol 89, pp 6961-6968; 1984.

Boatwright, J. et Fletcher, J.B. «The partition of radiated energy between P and S waves»; *Bull Seismol Soc Am*, vol 74, pp 361-376; 1984.

Boore, D.M. «The effect of finite bandwidth on seismic scaling relations»; dans : Earthquake Source Mechanics. S. Das, J. Boatwright, et C.H. Scholz (dir.), Am Geophys Union Monograph No. 37, pp 275-283; 1986.

Brune, J.N. «Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes»; *J. Geophys Res*, vol 75, pp 4997-5009; 1970.

Brune, J.N. «Correction»; *J. Geophys. Res*, vol 76, p 5002; 1971.

Chen, S.Z. et Hedley, D.G.F. «Waveform analysis and velocity structure at Quirke Mine and adjacent areas. Part 1: Source parameters for evidence of the failure zone»; *Division Report* MRL 90-117(TR), CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1990.

Chen, S.Z. «Waveform analysis and velocity structure at Quirke Mine and adjacent areas. Part 2: Extension of the failure zone»; *Division Report* MRL 90-130(TR), CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1990.

Chun, K.Y., Kokoski, R.J. et West, G.F. «Source spectral characteristics of Miramichi earthquakes: Results from 115 P-wave observations»; *Bull Seismol Soc Am*, vol 79, pp 15-30; 1989.

Cichowicz, A., Green, R.W.E., Brink, A.V.Z., Grobler, P. et Mountfort, P.I. «The space and time variations of microevent parameters occurring in front of an active stope»; *Proc 2nd Int Symp on Rockbursts and Seismicity in Mines*, Université du Minnesota, Minneapolis, pp 213-222; juin 1988.

Dysart, P.S., Snoke, J.A. et Sacks, I.S. «Source parameters and scaling relations for small earthquakes in the Matsushiro region, southwest Honshu, Japan»; *Bull Seismol Soc Am*, vol 78, pp 571-589, 1988.

Feignier. «How geology can influence scaling relations?» *Tectonophysics*, (sous presse), numéro spécial, Physics of the Seismic Source.

Fletcher, J.B., Haar, L.C., Vernon, F.L., Brune, J.N., Hanks, T.C. et Berger, J. «The effects of attenuation on the scaling of source parameters for earthquakes at Anza, California»; dans : Earthquake Source Mechanics, S. Das, J. Boatwright, S.H. Scholz (dir.), Am Geophys Union Monograph No. 37, pp 331-338; 1986.

Frankel, A. «The effects of attenuation and site response on the spectra of microearthquakes in the northeastern Caribbean»; *Bull Seismol Soc Am*, vol 72, pp 1379-1402; 1982.

Gibowicz, S.J. «Seismic moment and seismic energy of mining tremors in the Lubin copper basin in Poland»; *Acta Geophys Pol*, vol 33, pp 243-257; 1985.

Gibowicz, S.J., Harjes, H-P. et Schäfer, M. «Source parameters of seismic events at Heinrich Robert Mine, Ruhr Basin, Federal Republic of Germany: Evidence for nondouble-couple events»; *Bull Seismol Soc Am*, vol 80, pp 88-109; 1990.

Gutenberg, B. et Richter, C.F. «Magnitude and energy of earthquakes»; *Ann Geofis*, vol 9, pp 1-15; 1956.

Hanks, T.C. «f_{max}»; *Bull Seismol Soc Am*, vol 72, pp 1867-1880; 1982.

Hasegawa, H.S. «Lg spectra of local earthquakes recorded by the Eastern Canada Telemetered Network and spectral scaling»; *Bull Seismol Soc Am*, vol 73, pp 1041-1061; 1983.

Hedley, D.G.F. «Peak particle velocity for rockbursts in some Ontario mines»; *Proc 2nd Int Symp on Rockbursts and Seismicity in Mines*, Minneapolis, Minnesota, pp 503-512; juin 1988.

Kanamori, H. et Anderson, D.L. «Theoretical basis of some empirical relations in seismology»; *Bull Seismol Soc Am*, vol 65, pp 1073-1096; 1975.

Koctpob, G.B. «Source mechanics of tectonic earthquakes»; (en Russe), Moscou; 1975.

Madariaga, R. «What is an earthquake?» *Workshop on Forced Fluid Flow Through Strong Fractured Rock Masses*, Centre conf. CNRS, Garchy, France; avril 1987.

Malin, P.E. et Waller, J.A. «Preliminary results from vertical seismic profiling of Oroville microearthquakes S-waves»; Geophys Res Lett, vol 12, pp 137-140; 1985.

McGarr, A. «Some applications of seismic source mechanism studies to assessing underground hazard»; dans : Rockbursts and Seismicity in Mines. N.C. Gay, E.H. Wainwright (dir.), South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, Symp. Ser. 6, pp 199-208; 1984.

McGarr, A. «Some observations indicating complications in the nature of earthquake scaling»; dans : Earthquake Source Mechanics, S. Das, J. Boatwright, C.H. Scholz (dir.), Am Geophys Union, Monograph No. 37, pp 217-225; 1986.

Peppin, W.A. «What do spectral corner frequencies mean anyway?» (résumé). *Earthquake Notes*, vol 55, p 14; 1985.

Rautian, T.G., Khalturin, V.I. «The use of the coda for determination of the earthquake source spectrum»; *Bull Seismol Soc Am*, vol 68, pp 923-943; 1978.

Rudajev, V. and Sileny, J. «Seismic events with non-shear components: II. Rockbursts with implosive source component»; *Pure Appl Geophys*, vol 123, pp 17-25; 1985.

Semadeni, T., Rochon, P. et Niewiadomski, J. «Waveform analysis of mine induced seismic events recorded at Rio Algom's Quirke Mine»; *Proc 2nd Int Symp Rockbursts and Seismicity in Mines*, Minneapolis, Minnesota, pp 267-277; 1988.

Thatcher, W. et Hanks, T.C. «Source parameters of southern California earthquakes»; *J. Geophys Res*, vol 77, pp 1549-1565; 1973.

Trafunac, M.D. «Stress estimates for San Fernando, California, earthquake of February 9, 1971, main event and thirteen aftershocks»; *Bull Seismol Soc Am*, vol 62, pp 721-750; 1972.

Tucker, B.E. et Brune, J.N. «Seismograms, S-wave spectra and source parameters for aftershocks of the San Fernando earthquake, in San Fernando, California, earthquake of February 9, 1971»; U.S. Dept. of Commerce, III, pp 69-122; 1973.